

MODELOS BASADOS EN AGENTES APLICADOS A ESTUDIOS URBANOS: UNA APROXIMACIÓN TEÓRICA

Carolina de Carvalho Cantergiani

Universidad de Alcalá

Departamento de Geografía

Calle Colegios, 2

28801 Alcalá de Henares

Madrid

Tel.: +34 91 8854482

e-mail: carolina.carvalho@alu.uah.es

RESUMEN

Los Modelos Basados en Agentes (MBA) son un tipo de modelo prospectivo relativamente nuevo cuyas características permiten realizar simulaciones urbanas a escala regional, aunque hasta el momento hayan sido más aplicados a escala intra urbana, y mayoritariamente en otros campos de estudio (como la economía, ciencias políticas o la ecología). Sus principales características, tales como la capacidad de integrar el comportamiento de los agentes (que en este caso coinciden con los actores involucrados en el proceso de crecimiento urbano) a los cambios territoriales, los diferencian de otros modelos comúnmente aplicados a simulaciones urbanas. Los MBA permiten, a partir de (1) un conjunto de agentes, (2) un medio sobre el cual actúan y (3) unas reglas de comportamiento, simular los complejos fenómenos urbanos generados de forma agregada a partir de un patrón espacial resultante de comportamientos individuales. La diferencia de comportamiento observada por ese cambio de escala, del individual al agregado, permite estudiar cómo se generan los procesos urbanos y también manipular las variables de entrada para generar distintos escenarios. Mientras otros modelos de simulación se limitan a estudiar tendencias pasadas o diseñar escenarios en base a componentes fijos, o como mucho su transición según relación de vecindad existente en base a formulaciones matemáticas y estadísticas, los MBA están contruidos, además, en el marco de la simulación informática, lo que permite interpretaciones más realistas y mayor flexibilidad al considerar también el comportamiento de los agentes involucrados y sus relaciones. Este documento pretende presentar una revisión teórica de los Modelos Basados en Agentes aplicados a simulaciones urbanas, exponiendo su base teórica, componentes, estructura, aplicaciones, así como sus principales potencialidades y deficiencias.

Palabras Clave: Modelos Basados en Agentes, simulación urbana, simulación de escenarios.

ABSTRACT

Agent-Based Models (ABM) are relatively new prospective models with characteristics that allow urban simulations at regional scales, although mostly applied at intra-urban scale so far. Their main characteristics, as the ability to link the behavior of the agents (in this case, coincident with actors of urban growth process) to territorial changes, distinguish them from other models commonly applied to urban issues. ABM allows, within (1) a set of agents, (2) an environment in which agent act over, and (3) a set of behavior rules, to simulate urban complex phenomena that generate spatial patterns in an aggregate way derived from individual behaviors. The observed differences for these changes on scale – from an individual to an aggregate – help us to study how urban processes are generated and also to manipulate the inputs in order to generate different

scenarios. While other simulation models are limited to study past trends or to design scenarios based on static components or, even beyond, consider transition rules with respect to the neighborhood in the base of mathematics and statistics, ABM are built on the framework of informatics simulation, allowing more realistic interpretations and higher flexibility by considering the agents behavior and their relations. This document presents a theoretical review on Agent-Based Models applied to urban studies, regarding their concept, components, structure, applications, and also identifying their potentialities and limitations.

Key Words: Agent-Based Models, urban simulation, scenarios simulation.

1.- INTRODUCCIÓN

Los procesos urbanos son fenómenos de gran relevancia en la coyuntura actual de desarrollo territorial en el mundo. Su complejidad reside, principalmente, en el intento de controlar su expansión y buscar un equilibrio entre las relaciones territoriales y las demás – ambientales, culturales, sociales, económicas, y otras.

Entre las muchas formas disponibles para intentar comprender las dinámicas urbanas y los procesos territoriales, destacan los modelos espaciales, que de alguna manera representan el territorio y permiten estudiar algunos procesos, aproximándonos al entendimiento de los cambios observados entre el pasado y el presente, o incluso permitiendo proyectar otros hacia el futuro.

Entre el conjunto de modelos de simulación de cambios de usos del suelo y crecimiento urbano más avanzados en la actualidad (y también entre los más complejos), se encuentran los Modelos Basados en Agentes (*Agent-Based Models*). Se trata de un modelo híbrido que abarca algunas características de los modelos celulares (como los Autómatas Celulares, AC), pero también puede incorporar propiedades de modelos de dinámicas de sistemas, estadísticos o de flujos económicos, etc. Es un modelo que además permite a los investigadores estudiar cómo el comportamiento del sistema emerge y está conectado a las características y comportamiento de sus componentes individuales (Railsback y Grimm, 2009), o entender cómo el propio sistema afecta al individuo (Grimm y Railsback, 2005). Su mayor aporte reside en el hecho de que ofrece una forma de incorporar la influencia del proceso de toma de decisiones sobre el territorio de forma mecánica, formal y espacialmente explícita, tomando en cuenta las

interacciones sociales, procesos adaptativos y tomas de decisiones en diferentes escenarios (Matthews *et al.*, 2007).

Los MBA tienen un amplio rango de aplicaciones; además de la ecología, otras disciplinas tratan sistemas complejos compuestos de entidades autónomas, incluyendo las ciencias sociales, economía, demografía, geografía y ciencias políticas (es posible encontrar un número importante de ejemplos en Grimm *et al.*, 2006). En las ciencias sociales en general, las aplicaciones de MBA muestran un elevado potencial de modelización y simulación, facilitando el entendimiento de algunos fenómenos complejos y dando soporte a la planificación y comprensión de impactos territoriales.

Para O'Sullivan y Haklay (2000), está claro que los geógrafos y los planificadores tienen un papel importante en este campo de investigación, tanto en el plano teórico como en el práctico, contribuyendo principalmente al desarrollo de los aspectos espaciales de estos modelos. Sin embargo, las aplicaciones en el ámbito urbano están todavía infra-exploradas si consideramos su elevado potencial de modelización. Dada la escasa literatura que sobre estos modelos existe hoy día en español, la presente revisión e introducción teórica pretende aportar a la comunidad hispana un mayor conocimiento sobre los MBA y fomentar su investigación y desarrollo.

Así, se presentan en este documento sus principales conceptos y características, abarcando sus componentes, estructura y funcionamiento, partiendo de la literatura existente y de reflexiones propias. En resumen, este documento pretende presentar brevemente los MBA cuyas aplicaciones ofrecen muchas potencialidades y posibilidades en estudios de simulación de la expansión urbana, tema objeto de interés de este artículo.

2.-CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LOS MODELOS BASADOS EN AGENTES

Los MBA, como concepto, surgen en la década de los años 60, época de exploración de modelos de simulación territoriales, y más concretamente en el seno de las ciencias de la computación y ligados a la investigación de la inteligencia artificial de los años 70. Sin embargo, en este momento la atención se centró en otro tipo de modelos, principalmente debido a las todavía escasas capacidades informáticas y un escepticismo generalizado en cuanto a simulaciones espaciales. Así, este y otros modelos no fueron ampliamente desarrollados hasta muchos años después. A lo largo de las décadas de los 80 y 90, se redescubrieron los modelos individualistas y de pensamiento – en contraposición con el enfoque estructuralista y Marxista del período anterior (O'Sullivan y Haklay, 2000). En este momento se desarrollaron numerosos modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, aunque en su mayoría con perfiles prácticamente estáticos y con énfasis principalmente en la transición de estado entre celdas vecinas, abarcando la microsimulación, las redes neuronales y los autómatas celulares. A partir de los 90, inmersos ya en la sociedad del conocimiento y de la información (Castells, 1996, 1997, 1998¹), los MBA ganaron popularidad en las ciencias sociales, en el intento de reproducir aspectos espaciales y demográficos para la mejor comprensión de la evolución de la sociedad. En la última década la oleada de estudios de modelos basados en agentes se ha fortalecido, y con ella muchas plataformas y grupos de investigación dedicados a estos temas.

La simulación basada en modelos celulares, entre ellos los MBA, ha generado una nueva visión de la modelación. La introducción de los modelos celulares tiene su origen en los estudios de Von Neumann y Ulam, ambos matemáticos que investigaban las celdas y sus relaciones de vecindad. A partir de su trabajo, estos modelos evolucionaron dando lugar a los Autómatas Celulares (AC), cuya principal representación se plasma en el Juego de la Vida de Conway. Este modelo sencillo funciona de forma que, a partir de una secuencia de celdas, con un estado determinado, unas reglas de transición y en función del comportamiento respecto a la vecindad inmediata, cada unidad se comporta de forma di-

námica cambiando su estado inicial y conformando patrones espaciales. Los modelos celulares se desarrollaron a partir de estas primeras investigaciones para posicionarse como un tipo de modelo de potencial elevado de simulación y alta capacidad de modelación, especialmente adecuados para estudios de crecimiento urbano. Estos modelos evolucionaron (y siguen evolucionando) hacia otros tipos que incorporan nuevos desafíos en cuanto a la modelación. Es el caso de los modelos basados en agentes, que reúnen aspectos de movilidad, comportamiento e interacciones entre agentes y el medio.

Respecto a la utilización de MBA aplicados a las ciencias sociales, destaca uno de los primeros modelos –la segregación en la ciudad–, desarrollado por Thomas Schelling en la década de los 70 (Schelling, 1971). Dicho modelo demuestra cómo la segregación puede emerger de elecciones individuales, aun cuando todos los individuos sean razonablemente tolerantes.

Entre los primeros modelos multi-agentes merece especial atención el *Sugarscape* desarrollado por Epstein y Axtell (1996) a mediados de los 90 para estudios de fenómenos sociales. Este es un buen ejemplo de MBA que, aunque cuente con agentes relativamente simples, produce un rango de resultados interesantes sobre la emergencia de redes sociales, comercio y mercados, y diferenciación cultural. El *Sugarscape* modela una sociedad artificial donde los agentes se mueven en una malla regular, y donde cada celda dispone de una cantidad de “azúcar” que se renueva gradualmente, y con la que, además, los agentes ubicados en dichas celdas pueden alimentarse. Sin embargo, las cantidades de esta componente varían espacialmente en cada localización y de acuerdo a la cantidad de azúcar comido previamente; los agentes tienen como objetivo sobrevivir y para eso tendrán que moverse en búsqueda de más alimento. Si cosechan más azúcar de lo que pueden comer inmediatamente, pueden guardar para más adelante o, en variaciones más complejas del modelo, pueden negociarlo con otros agentes (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Nigel Gilbert y su libro *Social Simulation: Simulation for the Social Scientist* (Gilbert y Troitzsch, 2005), así como la creación del *Journal of Artificial Societies and Social Simulation (JASS)*, refe-

1 Citado en O'Sullivan y Haklay (2000).

rencia mundial en temas de simulación en ciencias sociales en la actualidad, constituyen referencias importantes en la revolución que ha supuesto este campo de estudio.

2.1.- Estructura Básica De Un Modelo Basado En Agentes

El principal elemento de un MBA, y como el propio nombre indica, son los **agentes**, pero también lo es el **medio** en el que se localizan, así como la **relación** entre estos agentes, o entre ellos y su medio, plasmados a través de reglas de comportamiento. En este apartado se presentan algunos de los principales conceptos de cada componente de los MBA, cómo funcionan e interactúan estos elementos y cuál es su papel dentro del modelo. Por último, se definen los Modelos Basados en Agentes a partir de estos tres elementos fundamentales.

Aunque pueda resultar sencillo visualizar un agente y comprenderlo dentro del contexto de los modelos de simulación, conceptualizarlo puede resultar un tema complejo. Muchos investigadores han presentado distintas definiciones, sin llegar todavía a un consenso de cómo definir un agente. Algunos modeladores consideran que un agente pueden ser componentes independientes (ej. personas, hogares, coches, instituciones, etc.); otros insisten en que además su comportamiento debe ser adaptativo para que sea considerado un agente, refiriéndose a aquellos componentes que pueden, de alguna forma, aprender de sus medios y cambiar su comportamiento conforme a éstos (Castle y Crooks, 2006). En ese segundo grupo se encuentra Gilbert, que plantea que el objetivo del diseño de un agente es crear programas que interactúan de forma inteligente con su medio (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Ciertamente la inteligencia es un elemento común en todas las concepciones de agentes, pero también lo es su rol en el modelo en cuanto a su comportamiento y su relación con otros agentes y su medio. Así, para Michael Batty, los agentes son objetos que no tienen ubicación fija, pero que actúan e interactúan uno con el otro, así como con el medio sobre el cual se desarrollan, de acuerdo a un determinado propósito (Batty, 2005).

De todas formas, estas y otras características son comunes a los agentes que protagonizan los MBA, y en las cuales, con pequeñas variaciones,

coinciden la mayoría de los modeladores (Wooldrige y Jennings, 1995; Franklin y Graesser, 1996; Epstein, 1999; Macal y North, 2005; Torrens y Benenson, 2005; etc.). A continuación se presenta una serie de características que deben poseer los agentes, a partir de la compilación y conclusiones de estos autores:

- **Autónomo:** gobierna sin influencia de control centralizado, es capaz de procesar información e intercambiarla con otros agentes para tomar decisiones independientes;
- **Heterogéneo:** no existe un individuo medio, aunque pueden existir grupos de agentes que se generan desde abajo hacia arriba (fenómeno *bottom-up*), resultando una fusión de individuos autónomos similares;
- **Activo:** ejerce influencia independiente en una simulación. Aun así, puede ser activo de las siguientes formas: proactivo/orientado a metas (reacciona según un objetivo a alcanzar), reactivo/perceptivo (percibe su alrededor y otros elementos), racional limitado (capacidad de solucionar problemas por deducción para mejorar su situación, aunque con percepción limitada), interactivo/comunicativo (se comunica con otros agentes), móvil (puede recorrer el espacio en un modelo) o adaptativo (puede cambiar su estado dependiendo de su estado actual, adaptándolo a partir de una forma de memoria o aprendizaje).

Además, los agentes, cuando representan personas, transmiten la naturaleza propositiva de las actividades humanas, donde con frecuencia se les atribuye cierto grado de intencionalidad (creencia, motivos, emociones, etc.), libre arbitrio y poder para alcanzar sus propios objetivos (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Finalmente, Franklin y Graesser (1996) formalizan la definición de agente autónomo como un sistema situado en un medio (y parte de él), que lo siente y actúa sobre este medio a lo largo del tiempo en función de su propio interés, y así lograr lo que pretende en el futuro. Por ejemplo, es común que los estudios de crecimiento urbano consideren las personas como agentes, pero también puede serlo las edificaciones, los hogares, las empresas, comercios, los políticos, entre otros.

Por otro lado, y no menos importante, el **medio** sobre el cual se sitúan los agentes tiene especial relevancia en los MBA, ya que define el espacio en que estos operan, sirviendo de soporte a su interacción con ese medio y otros agentes (Castle y Crooks, 2006). Según Epstein (Epstein y Axtell, 1996) el medio es un elemento separado de los agentes, en el cual operan y con el cual ellos interactúan. Por ejemplo, la zonificación urbana o el uso del suelo pueden ser un buen ejemplo en cuanto a análisis territoriales en el ámbito urbano.

Los agentes en un MBA interactúan entre ellos y con el medio a partir de unas **reglas de transición**, en función de su comportamiento, su estado y sus intereses. Conforme señala Epstein y Axtell (1996), las reglas que motivan el comportamiento de los agentes se plasman en las variaciones de relaciones entre ellos y el exterior (otros agentes o el medio). Esta capacidad de percibir el espacio, interactuar con los demás elementos, cambiar o mantener su estado, buscar alcanzar un objetivo, permiten a los agentes relacionarse y comportarse de determinada manera, cuyas respuestas serán el elemento motivador de la simulación. Aquellas relaciones agente-medio determinan el movimiento, y resultan de los intereses de los agentes, así como de la relación espacial de distancia, disponibilidad, ocupación, preferencias, entre otros. Por ejemplo, un determinado grupo de población puede desear estar ubicado cerca de una infraestructura de transporte público, valorando espacios con estas características al decidir cambiar su localización. Las reglas medio-medio pueden definirse a través de procesos de autómatas celulares, que consisten en ramificar el espacio en una malla de celdas usualmente regulares, cuyo estado asignado cambia en el tiempo siguiente acorde al estado de las celdas vecinas y una serie de reglas de transición. Es el caso de los cambios de los usos del suelo por la influencia de los usos adyacentes. Finalmente las reglas agente-agente, son definidas en función de la relación existente entre ellos y principalmente de sus características (activo, independiente, seguidores, reproductores, etc.). Así, estas relaciones pueden ser de acoplamiento, combate o negociación. La segregación social es un claro ejemplo de esta relación, al estar interesado un determinado grupo en localizarse en un ambiente con elementos de similares características.

Al entender qué son los agentes, cómo pueden interactuar con otros agentes y con su medio, y

qué determinan las reglas de comportamiento planteadas, resulta fácil comprender el concepto de **Modelos Basados en Agentes**. En primer lugar, la mayoría de los autores está de acuerdo en que los MBA están compuestos de múltiples agentes interactivos ubicados en un medio simulado o modelado. En estos modelos, es necesario especificar una relación entre agentes, conectándolos entre sí y/o con otras entidades del sistema, y cuyas características se definen en función de sus percepciones del exterior y del estado de su conocimiento, con el objetivo de alcanzar sus propios intereses. Estas relaciones pueden ser definidas de varias formas, desde una reacción simple hasta aquellas orientadas a metas (dependiendo del tipo de agente y sus características). Independientemente del tipo de agentes que componen el modelo, su comportamiento puede ser programado para ejecutarse de forma sincronizada o descompasada (Ferber, 1999; Aguilera Ontiveros, 2000; Axelrod, 2005; Castle y Crooks, 2006).

Técnicamente, el término Modelos Basados en Agentes se refiere al uso de métodos computacionales para investigar procesos y problemas que se consideran sistemas dinámicos de agentes interactivos (Smith *et al.*, 2009), y cuya estructura de elementos, interacciones y cambio de estado se visualiza en la Figura 1.

Respecto al término MBA, existe toda una variedad de acrónimos en la literatura, pero en la mayoría de los casos tienen idéntico significado o aluden a conceptos bastante similares. Así, encontramos denominaciones tan variadas como *Agent-Based Computational Modelling/ABCM*, *Agent-Based Social Simulation/ABSS*, *Agent-Based Computation Simulation/ABCS*, *Agent-Based Modelling and Simulation/MBAS*, *Individual-Based Models/IBM* (aunque este último es más utilizado en ecología).

Quizás merecería la pena destacar el término Sistemas Multi-Agentes – SMA (o *Multi-Agent Systems - MAS*), porque se confunden mucho con los MBA y no coinciden del todo en su concepción. El campo de los MAS (apenas aplicado a las ciencias sociales) es bastante reconocido en investigaciones basadas en Inteligencia Artificial, y aunque los MBA también presenten raíces en ese campo, no están limitados al diseño y comprensión de agentes artificiales. Por lo tanto, la diferencia entre estos dos modelos va más allá de una forma diferente de denominación.

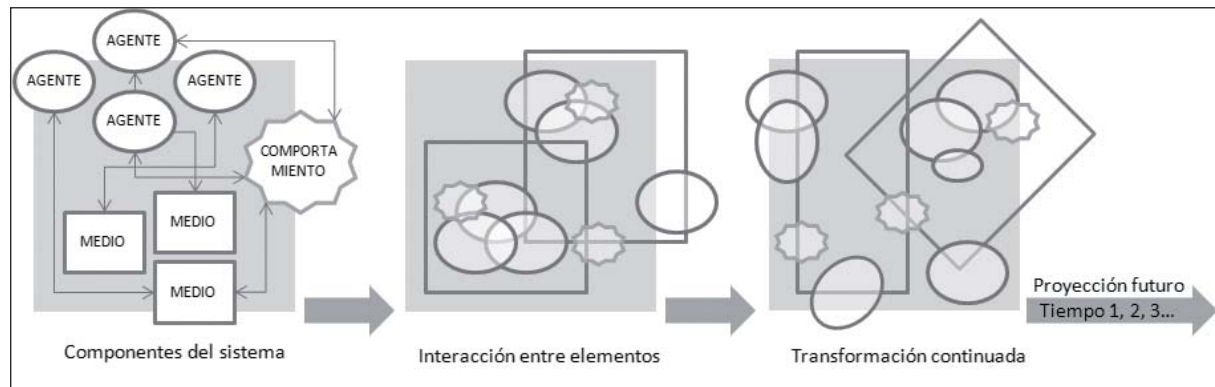


Figura 1.- Esquema de funcionamiento de un MBA.

2.2.- Aspectos Técnicos

En cuanto a los aspectos técnicos de los MBA, sus estructuras son más complejas que las de los modelos analíticos tradicionales y, como consecuencia, son más difíciles de analizar, entender y comunicar. Además, tampoco están adecuadamente descritos en muchas publicaciones existentes, o resultan de difícil lectura, incompletos o ambiguos y, por tanto, menos accesibles. Ello hace que la mayoría de los modelos publicados no sea fácilmente reproducible (Grimm *et al.*, 2006).

Por esa razón, Grimm *et al.* (2006) decidieron proponer un protocolo para resolver los principales problemas en cuanto a la descripción de los MBA, al cual llamaron *ODD (Overview, Design concepts and Details)*. Esta puede ser considerada la primera iniciativa para establecer un protocolo de descripción de un MBA, lo que es un paso prometedor en cuanto a la aplicación de modelos basados en agentes a las ciencias sociales y otros campos afines (Polhill, 2010).

Además de la correcta y clara descripción del modelo, también es fundamental conocer la **plataforma** sobre la cual se desarrollan. Los MBA requieren una base informática para asociar los agentes, reglas, relaciones, y permitir la correcta ejecución del modelo. Actualmente existen distintas plataformas sobre las cuales se pueden desarrollar, basadas en diferentes lenguajes de programación, interfaz o sistemas operativos, así como también existen distintos programas, modelos, herramientas y aplicaciones para MBA.

Algunos autores han elaborado ya estudios donde se analizan los programas según algunas características útiles para apoyar la elección de

la plataforma y sistemas de simulación y modelación más adecuados, identificando los criterios clave a ser consultados para tomar esa decisión (Parker *et al.*, 2001; Serenko y Detlor, 2002; Tobias y Hofmann, 2004; Railsback *et al.*, 2006; Castle y Crooks, 2006; Smith *et al.*, 2009). Los elementos más citados en estas compilaciones son: SWARM, RePast, NetLogo y StarLogo, AgentSheet, OBEUS, MASON, AsCape, AnyLogic, CORMAS. Una selección importante provee licencia con código abierto, permitiendo a los modeladores desarrollar sus propias creaciones sobre el trabajo previo de otros investigadores. Esto minimiza el tiempo y coste en la creación de nuevos modelos (Parker, 2005), lo que, sin duda, siempre resultará enriquecedor desde el punto de vista científico.

Aunque existan amplias opciones en cuanto a la aplicación de MBA, Castle y Crooks (2006) resaltan que existe una serie de limitaciones en cuanto al uso de estos sistemas de modelación o simulación. Entre ellos el esfuerzo sustancial para comprender cómo diseñar e implementar un modelo en algunos programas; la dificultad de comprensión o aplicaciones diferentes del código de programación de modelos producidos por otros investigadores; la exigencia de tener un conocimiento previo del lenguaje de programación requerido; o la posible falta de funcionalidades deseadas o requeridas.

Desafortunadamente, además de las desventajas presentadas, podemos afirmar que la relación entre el poder de simulación de los programas existentes y la dificultad para desarrollarlo suele ser directamente proporcional, principalmente por el alto nivel de complejidad en cuanto al comportamiento humano en modelos, por ejemplo, de cambios de ocupación del suelo. Según Agar-

wal *et al.* (2002), en la modelación, las dos dimensiones básicas que definen un estado inicial sobre el cual los procesos biofísicos y humanos acontecen son el tiempo (ejecución a corto o largo plazo) y el espacio (representación espacial de los datos). Pero, en los modelos que incorporan procesos humanos, como es el caso de los MBA, aparece una tercera dimensión presentada como toma de decisiones humana (capacidad en cuanto al tratamiento de procesos de decisión humanos). La complejidad del modelo se indica según la combinación de diferentes niveles que se representan en estas tres dimensiones. El siguiente esquema explica los niveles de complejidad de algunos tipos de modelos de estudios de cambios de ocupación del suelo (Figura 2). En ese gráfico, los MBA se podrían localizar en el punto coincidente de los niveles máximos de todos los ejes.

Otro desafío destacable es la integración entre los MBA y los SIG. En principio pueden estar vinculados de diferentes formas y a diferentes niveles. Los modelos pueden leer los datos espaciales del mundo real a través de un Sistema de Información Geográfica (SIG) o también potencialmente publicar resultados en un formato legible por éste. Si las funcionalidades SIG son solicitadas en tiempo de ejecución, se pueden crear modelos integrados, que pueden ser: (1) programas SIG y MBA independientes que se comunican vía archivos independientes; (2) modelos que utilizan programas independientes pero que se comunican a tra-

vés de base de datos compartidas o memoria virtual y; (3) modelos *stand-alone* que implementan funcionalidades SIG dentro del propio modelo MBA (Parker, 2005). De todas formas, pocos MBA poseen una interacción completa entre el proceso de simulación y la representación en un SIG. Entre ellos un modelo que destaca, en cuanto al desarrollo de herramientas que permitan esa conexión, es el *RePast* (a través de la extensión *Agent Analyst* de ArcGIS).

Todo lo expuesto refuerza la dificultad de implementar los componentes de un MBA en un modelo, ya que se debe tener en cuenta los diferentes agentes, su heterogeneidad y subagrupación, las relaciones con el exterior (otros agentes o el medio), la dinámica de interacción entre todos los elementos de forma simultánea, el aspecto temporal de cambios y la representación espacial. La difícil tarea de estructurar el modelo y ponerle a punto de ejecución puede ser minimizada – aunque no eliminada – con la programación orientada a objetos, que ofrece un marco excelente que facilita estos tipos de representación y, además, permite la descripción de autómatas simples y colectivos de forma adecuada (Smith *et al.*, 2005).

2.3.- Verificación y Validación

Una vez desarrollado, todo programa computacional debería ser verificado para saber si el mo-

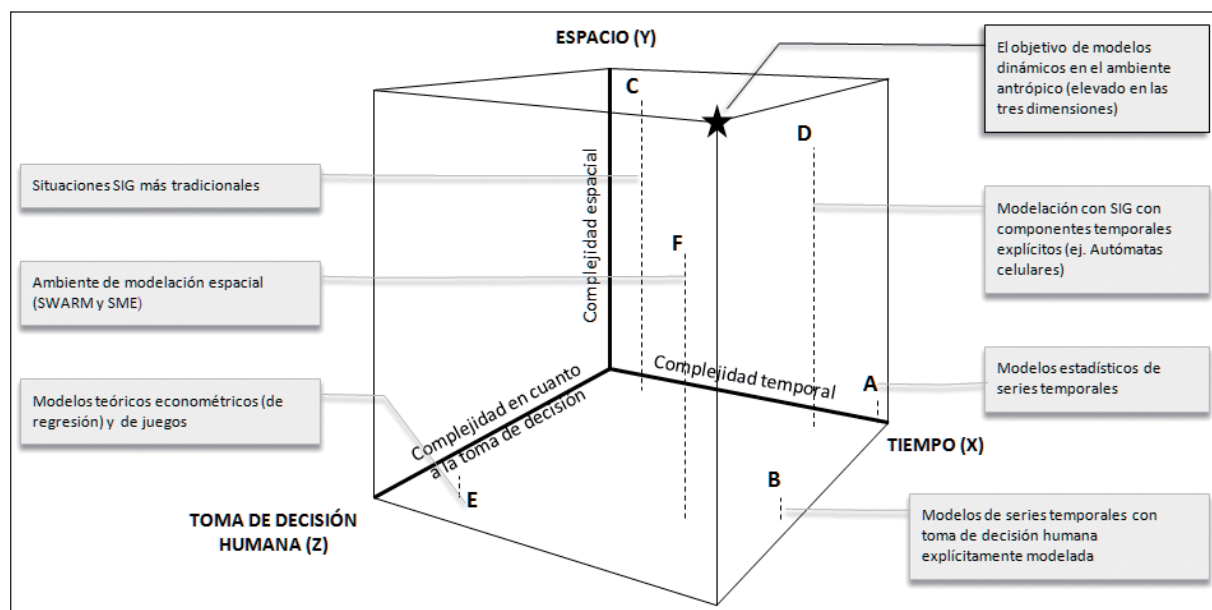


Figura 2.- Nivel de complejidad de modelos de cambios de usos del suelo según los tres niveles de complejidad (adaptado y traducido de Agarwal *et al.*, 2002).

delo está correctamente construido e implementado y se comporta conforme a lo esperado. Esta validación interior (Axelrod y Tesfatsion, 2006) puede ser llevada a cabo a través del análisis de los resultados en distintas situaciones. En general podemos decir que la dificultad reside en que un programador no puede conocer si los resultados no esperados son reflejo de un error en el programa computacional (un 'bug'), errores lógicos del modelo, o una consecuencia de una característica emergente del propio modelo (Gilbert y Terna, 1999²). Por ese motivo, realizar este procedimiento resulta especialmente difícil en simulaciones complejas. La ejecución repetida del modelo puede producir resultados diferentes, lo que complica aún más el proceso de verificación (Gilbert y Troitzsch, 2005).

Una vez verificado el modelo, debería procederse a su calibración y validación. La calibración consiste en comprobar si la configuración de la estructura y los valores de los parámetros del modelo reflejan correctamente el mundo real, lo que normalmente requiere datos de procesos a micro-nivel (Castle y Crooks, 2006). Con la validación se pretende asegurar si el comportamiento del modelo corresponde al comportamiento del objetivo para el que fue diseñado (Gilbert y Troitzsch, 2005). Esta validación debería realizarse a través de la comparación de los resultados obtenidos con datos semejantes del mundo real (Castle y Crooks, 2006). Aún así, un modelo no puede simplemente clasificarse como válido o no válido, ya que estas dos clases son los extremos de distintos grados de validez (Law y Kelton, 1991³). Además, hay que tener presente que en un MBA se modelan situaciones futuras basadas en una serie de variables de entrada que pueden alterarse según el escenario deseado, no existiendo datos reales futuros con los que comparar los resultados, por lo que su validación completa resulta bastante difícil.

Por otro lado, también es deseable la ejecución de un análisis de sensibilidad del modelo que nos aporte información sobre la robustez de los resultados (Castle y Crooks, 2006). El objetivo de este proceso es saber hasta qué punto el modelo es sensible a pequeños cambios en los parámetros y condiciones iniciales, permitiendo volver a analizar los resultados después de cambiar su-

tilmente los datos de entrada (Gilbert y Troitzsch, 2005). Sin embargo hay que tener en cuenta que los sistemas complejos pueden exhibir cambios bruscos y repentinos en el comportamiento del sistema como resultado de ligeras perturbaciones en los datos de entrada (Manson, 2007).

Calibración y validación son sin duda las dos cuestiones más difíciles respecto a la aplicación y desarrollo de un MBA. Aunque pueda haber correspondencia entre el resultado del modelo y el mundo real, eso no supone una condición suficiente para concluir que el modelo está correctamente elaborado (Gilbert, 2005). Los estudios de análisis de sensibilidad son un poco más comunes y necesarios cuando estos modelos se utilizan para la simulación de situaciones futuras que no pueden ser contrastadas con datos reales. En estos casos sólo es posible llevar a cabo una validación parcial. Aunque todavía esta práctica no es muy habitual y es un tema todavía abierto y pendiente, encontramos ya en la literatura algún ejemplo en este sentido. Así, Acosta-Michlik *et al.* (en prensa) analizan las variaciones que un modelo de cambios de usos del suelo podría sufrir al variar algunos de los parámetros globales de entrada y de las reglas de decisión de los agentes (en este caso agricultores).

3.- APLICACIÓN DE MODELOS BASADOS EN AGENTES EN LOS ESTUDIOS URBANOS

La simulación en las ciencias sociales se ha visto influenciada de forma significativa por el desarrollo de la teoría de los autómatas celulares (en la física y matemática) y de la ciencia de la computación (inteligencia artificial distribuida y tecnología de agentes) (Gilbert y Troitzsch, 2005). En general, los modelos utilizados en estas simulaciones suelen producir diferentes tipos de análisis y escenarios prospectivos, que pueden ser desagrupados en predictivos (carácter descriptivo), exploratorios (carácter explicativo), o normativos (deseado) (Parker *et al.*, 2001; Aguilera Benavente *et al.*, 2010).

² Citado en Castle (2006).

³ Citados en Castle y Crooks (2006).

3.1.- Tipos de Escenarios de Simulación Urbana

En la literatura encontramos algunas clasificaciones de escenarios de simulación según el tipo de resultado que se pretenda obtener. Partimos de la suposición de que los escenarios de simulación de crecimiento urbano son, en principio, prospectivos, correspondiéndose generalmente con situaciones futuras probables, posibles o deseables. De esa forma, los tres tipos de escenarios producidos (predictivos, exploratorios y normativos), varían según la orientación futura que representan (Aguilera Benavente *et al.*, 2010). En la tabla 1 se resumen algunas características de estos tres grupos, compilados a partir de trabajos de varios modeladores.

El primer grupo representa escenarios probables, que tienen como objetivo conocer lo que puede suceder en un plazo de tiempo generalmente corto (Aguilera Benavente *et al.*, 2010). Dentro de estos escenarios predictivos, hay una ramificación que se basa, o en las predicciones *per se*, o en las técnicas *what if?* (¿qué sucedería

si...?). Este último se considera más adecuado en estudios de simulación de expansión urbana por permitir generar varias posibilidades según variaciones en los datos de entrada, lo que es muy útil en función de la gran complejidad del fenómeno y de la dinámica acelerada de los cambios urbanos. Este grupo enfatiza principalmente los resultados y la validez del modelo.

El segundo grupo, de escenarios exploratorios, muestra evoluciones posibles de crecimiento, y contestan a la pregunta ¿qué puede pasar?, en el caso de que un planteamiento u otro se elija en base a una teoría o hipótesis. Los dos ramos de este grupo son escenarios externos y estratégicos (Börjeson *et al.*, 2005). Mientras el primero se centra en las evoluciones de los sistemas como consecuencia de factores que escapan al campo de acción del planificador, como son los aspectos globales, económicos, etc., los estratégicos describen una serie de posibles consecuencias en base a decisiones estratégicas. El principal enfoque de los escenarios exploratorios se centra en las decisiones a tomar.

ESCENARIO	PREDICTIVOS	EXPLORATORIOS	NORMATIVOS
Pregunta	¿Qué pasará?	¿Qué puede pasar?	¿Qué debería pasar?
Escenarios futuros	Probable	Posible	Imaginario
Carácter	Descriptivo	Explicativo	Deseado
Objetivos	<ul style="list-style-type: none"> • Extrapolar tendencias • Evaluar escenarios • Predecir estados futuros • Imitar el mundo real 	<ul style="list-style-type: none"> • Explorar teorías • Generar hipótesis • Probar hipótesis 	<ul style="list-style-type: none"> • Discutir metas deseables • Imaginar el futuro ideal
Variación de escenarios	<i>Predicción o what if?</i>	Externos o estratégicos	De optimización o de transformación
Énfasis	Resultados y validez	Decisiones a tomar	Planteamiento de transformaciones necesarias
Resultados	Esperanza de que esté bien	Ejerce cierto control sobre los resultados	Control total sobre resultados
Modelos más comúnmente utilizados	MBA	MBA, CA, Regresión logística	CA, AMC (multicriterio)

Tabla 1.- Resumen de las características de los distintos tipos de modelos prospectivos de simulación urbana (compilado a partir de Couclelis, 2001; Parker *et al.*, 2003; Börjeson *et al.*, 2005; Smith *et al.*, 2009 y Aguilera Benavente *et al.*, 2010).

Por último, los escenarios normativos consisten en generar escenarios óptimos según metas deseables. Este grupo responde a la pregunta ¿qué debería pasar?, y su enfoque está principalmente en el planteamiento de las transformaciones necesarias para alcanzar un estado determinado.

Así dicho, los tres grupos de escenarios, predictivos, exploratorios y normativos, tienen enfoques distintos y algunos modelos son más comúnmente usados en una u otra orientación. En el caso de los MBA, concretamente en aplicaciones urbanas, pueden encajarse en uno o más de los enfoques presentados, ya que se consideran como un laboratorio en miniatura, donde los atributos y el comportamiento de los agentes y el medio en el cual se establecen pueden ser alterados, y sus repercusiones pueden ser observadas a lo largo de la ejecución de varias simulaciones (Castle y Crooks, 2006). De esta forma, encajarían en los escenarios *what if?* por tratarse de un modelo que sirve, no solo para extrapolar tendencias, sino también para visualizar las probables modificaciones en el territorio a partir de cambios en las variables iniciales. Por otro lado, los MBA podrían utilizarse en el contexto de escenarios exploratorios estratégicos, por plantear cómo la realidad debería, o sería, bajo determinadas circunstancias, aunque no pretende reproducir sistemas actuales (Parker et al., 2003). Por último, aunque todavía no es muy común, también empiezan a aparecer en la literatura estudios de MBA en el contexto de estudios normativos (Hollander y Wu, 2011).

3.2.- Potencialidades y Deficiencias de los MBA

En el contexto de los modelos de simulación aplicados a las ciencias sociales, y más concretamente a los temas urbanos, los MBA son considerados modelos muy adecuados. Las principales características de los modelos basados en agentes son la posibilidad de considerar el comportamiento de los agentes al estudiar los cambios territoriales; permitir el movimiento libre de los agentes en el área de estudio, no estando restringidos a una vecindad inmediata (pudiendo ser los agentes, incluso, entidades no espaciales); y la capacidad de capturar fenómenos emergentes, que reflejen el comportamiento individual en la aparición de patrones espaciales. Algunos autores consideran los MBA modelos idóneos para trabajar con fenómenos complejos (como las dinámicas urbanas) debido a la rela-

tiva facilidad que estos presentan para incorporar algunas de sus características, como auto-organización, caos, adaptación, etc.

A pesar de tales opiniones, es innegable que los fenómenos complejos poseen algunas características que los hacen difíciles de modelar. La principal de ellas es la emergencia, que se caracteriza por la aparición de patrones macroscópicos que surgen a partir de interacciones locales de entidades individuales (Epstein y Axtehl, 1996). Los MBA son capaces de capturar este tipo de fenómenos, pero también son bastante sensibles a las condiciones iniciales del sistema y a pequeñas variaciones en las reglas de interacción (Couclelis, 2001), resultando difícil la reproducción de productos idénticos a partir de la ejecución del mismo modelo.

Además de la capacidad de capturar fenómenos emergentes, otra de las principales ventajas que los MBA ofrecen en cuanto a las simulaciones espaciales es que éstas se benefician de las posibilidades de movilidad que ofrecen. La implementación de las interacciones entre los agentes puede ser fácilmente gestionada según el espacio, redes o una combinación de estructuras. Los MBA pueden regular comportamientos basados en interacciones en una distancia y dirección específicas. Así, estos modelos disponen de un marco robusto y flexible para sintonizar la complejidad de los agentes (por ejemplo, su comportamiento, grado de racionalidad, habilidad de aprender y evolucionar, y reglas de interacción).

Por otro lado, es sabido que cada simulación está modelada de forma que responda a las necesidades particulares según los intereses del modelador o exigencia del usuario final, y lo mismo sucede con los MBA. Por su planteamiento inicial en cuanto a la selección de agentes, medios y reglas de interacción (pero principalmente por los factores subjetivos a ellos vinculados), estos modelos son difícilmente replicables en otras áreas de estudio de forma directa. En este sentido, y tal y como afirman Castle y Crooks (2006), estos modelos, como otros muchos, son tan útiles como el propósito por el cual fueron construidos.

Finalmente, entre las principales limitaciones técnicas habría que destacar que los MBA contemplan los sistemas modelados a un nivel de detalle que normalmente involucra la descripción de atributos y comportamientos de muchos agentes y sus interacciones con el medio (Castle y Crooks, 2006). Esto estaría en clara contraposi-

ción con el principio KISS (*Keep It Short and Simple*), que apoya la elaboración y diseño de modelos sencillos y de fácil comprensión. Según Axelrod (2005), la simplicidad es un factor positivo en el desarrollo de los MBA y su complejidad intrínseca no debe encontrarse en las suposiciones del modelo, sino en los resultados simulados.

A pesar de las limitaciones presentadas, la investigación con aplicaciones de MBA en simulaciones de expansión urbana despierta un creciente interés y desarrollo. Las potencialidades que presentan, en contraposición a las deficiencias que se puedan identificar, los hacen bastante adecuados para estudiar el comportamiento de los agentes y los cambios territoriales resultantes de sus interacciones.

3.3.- Aplicaciones

Como ya se ha mencionado, los MBA desde su aparición han sido aplicados a numerosos y variados campos. En geografía, fue sólo en la última década cuando empezaron a ser considerados como un modelo de interés, especialmente al ser aplicables al estudio de dinámicas territoriales, integrando fenómenos sociales y económicos, aspectos clave de la geografía humana. Aunque encontremos algunas aplicaciones en este campo, si nos ceñimos a los estudios de crecimiento urbano, apenas encontramos en la bibliografía trabajos basados en MBA, principalmente al compararlo con su amplia y previa aplicación en otros campos. A continuación presentaremos una breve selección de aplicaciones de MBA a estudios de simulación de expansión urbana, la mayoría a escala intra-urbana.

En primer lugar habría que mencionar los trabajos del grupo de investigación de CASA (*Centre for Advanced Spatial Analysis - University College London*), dirigido por Michael Batty. Uno de ellos simula la evacuación de peatones en la estación de metro *King's Cross St. Pancras* en Londres (Castle, 2006), a partir de la definición de movimientos y comportamientos individuales que se convierten en movimientos agregados en casos de emergencia; o el control y análisis del comportamiento de multitudes en el desfile de Carnaval de *Notting Hill* (Batty *et al.*, 2003) donde se simula el movimiento de las personas en la calle, estudiando la formación de cuellos de botella e intentando reducir la congestión hasta que se pueda planificar una solución segura en cuanto a las rutas establecidas. También desta-

camos el modelo STREETS (Schelhorn *et al.*, 1999), que simula el movimiento de peatones en un distrito urbano, que a su vez tienen actividades y destinos pre-definidos y programados. El objetivo del modelo es entender las rutas alternativas que trazan los agentes influenciados por su localización y elementos de atracción.

Uno de los pocos ejemplos de aplicaciones de MBA a escala regional lo constituye el modelo HILIFE (*Household Interactions through LIFE Cycle Stages*) (Fontaine y Rousevell, 2009), cuyo objetivo principal es modelar la demanda residencial en la región policéntrica de East Anglia - Reino Unido. Este modelo simula patrones urbanos de usos del suelo en una escala regional, integrando el conocimiento cualitativo de las preferencias de localización residencial de diferentes agentes (población) con los análisis cuantitativos de las dinámicas de crecimiento urbano, para un período de 25 años. En este modelo, la preferencia de los agentes se define principalmente por la etapa de su ciclo de vida (infancia, familias con o sin hijos, vejez) y sus cambios, identificado como el factor predominante de decisiones de localización residencial (cercanía a elementos de atracción territorial), por encima, inclusive, de motivos económicos (Figura 3).

Otro ejemplo es el modelo OBEUS (*Object-Based Environment for Urban Simulation*), que ha sido una referencia importante en cuanto a MBA aplicados a escala regional, ya que fue diseñado específicamente para simulación de fenómenos urbanos. Este modelo pretende ser el nivel operativo de la teoría de los *Geographic Automata Systems* (GAS) (Benenson y Torrens, 2004), que sostiene que los conceptos de los CA y los MBA podrían estar idealmente combinados. Los GAS consideran que un sistema urbano está compuesto por objetos fijos (casas, carreteras) o no-fijos (personas, coches) relacionados. Un trabajo destacable es la simulación de la distribución de residencia étnica en Tel Aviv entre 1955-1995, que es ocupado conjuntamente por árabes y judíos. El modelo demuestra la importancia de aspectos cualitativos en la elección de residencia a través de MBA (Benenson *et al.*, 2002; Benenson y Torrens, 2005). Según estos autores, GAS y OBEUS pueden servir como un marco universal para simulaciones urbanas orientadas a objetos.

El modelo SLUDGE (*Simulated Land Use Dependent on Edge Effect Externalities*), creado por Dawn Parker (2005) y desarrollado en la plataforma *RePast*, es un modelo combinado de MBA

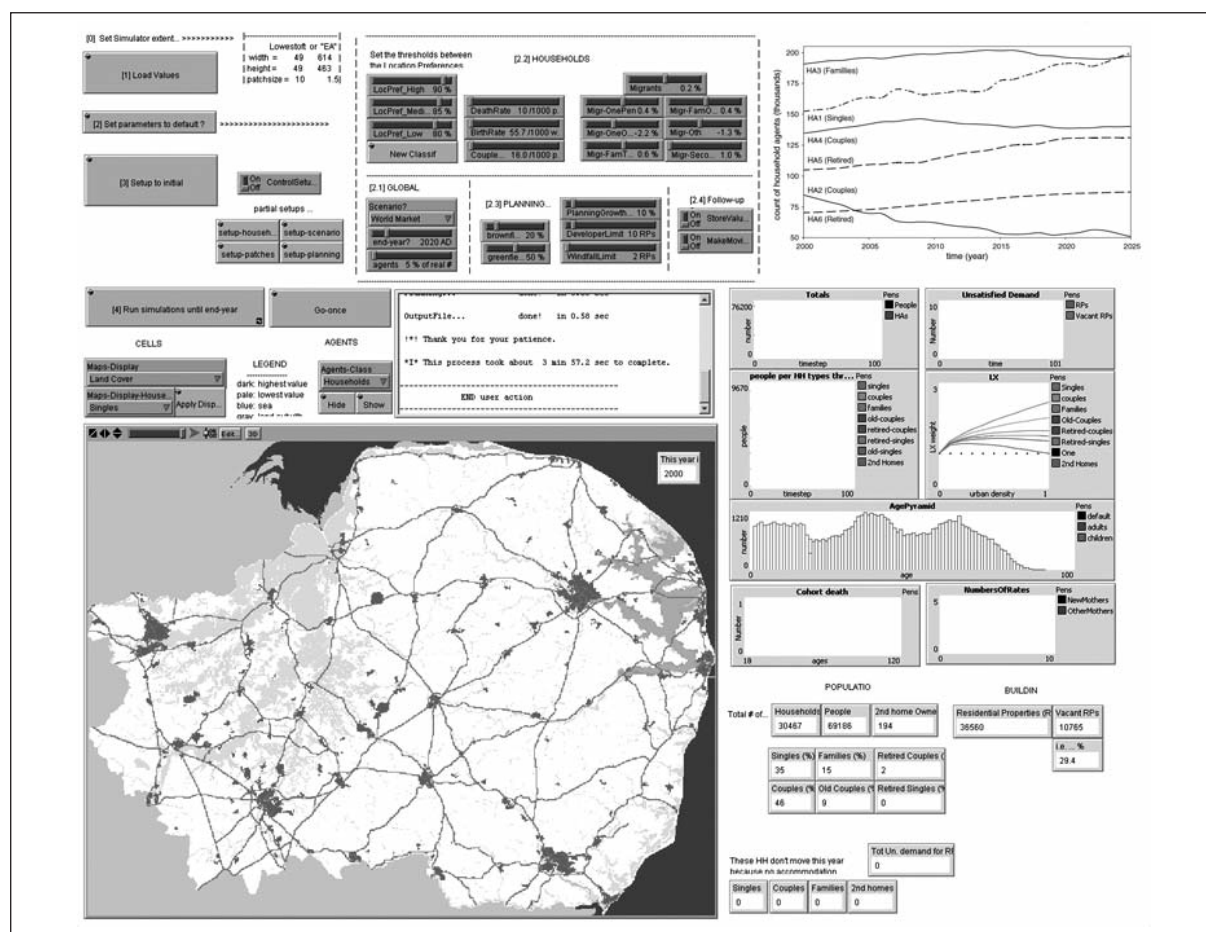


Figura 3.- Interface del modelo HI-LIFE en NetLogo y proyección demográfica de agentes para simulación de 25 años (Fontaine y Rounsevell, 2009).

y AC, diseñado para el estudio de la influencia articulada de externalidades y costes de transporte en función de la distancia, en los patrones de usos del suelo. Aunque se aplica principalmente a temas relacionados con la agricultura sería posible, con algunos ajustes, replantear su aplicación a simulaciones de crecimiento urbano.

Por último, el proyecto SLUCE (*Spatial Land Use Change and Ecological Effects*) y su modelo SOME (SLUCE's Original Model for Exploration), desarrollado sobre la plataforma SWARM, tiene como objetivo explorar la dinámica de crecimiento en la franja urbano-rural, teniendo en cuenta la influencia del patrimonio paisajístico en el desarrollo de estas áreas.

En España, existen investigaciones de modelos basados en agentes aplicados a áreas distintas a la urbana. Por ejemplo, publicaron recientemente documentos sobre estos temas el Grupo de Investigación en Sistemas Complejos de la Universidad Politécnica de Cataluña, el Instituto para Sistemas

Complejos y Físicos CROS disciplinares – IFISC de la Universidad de las Islas Baleares y Consejo Superior de Investigaciones Científicas, el Centro de Ingeniería de Sistemas Sociales – INSISOC de las Universidades de Valladolid y Burgos, el Instituto de Investigación en Inteligencia Artificial – IIIA del Consejo Superior de Investigaciones Científicas o el Centro de Tecnología de Información Inteligente – CETINIA de la Universidad Rey Juan Carlos. Sin embargo, por el momento desconocemos la existencia de aplicación de MBA enfocado a estudios de simulación de crecimiento urbano a escala regional en España.

4.- CONCLUSIONES

En este artículo hemos pretendido presentar una visión general de la base teórica de los MBA, su definición, sus componentes y las principales aplicaciones, especialmente en el ámbito urbano. A partir de esta introducción teórica y de la discusión realizada a lo largo de este documento, po-

demos extraer algunas conclusiones principales. En primer lugar, queremos destacar que los Modelos Basados en Agentes constituyen un modelo innovador y prometedor respecto a otros modelos aplicados a simulación de la expansión urbana, debido principalmente a la potencialidad que presenta para incorporar aspectos del comportamiento individual de los agentes en fenómenos emergentes que generan un patrón espacial agregado.

Por ese motivo, en el campo de la geografía (aunque todavía no hayan sido ampliamente aplicados) estos modelos basados en agentes tienden a ocupar un espacio importante por demandar cada vez más, y especialmente en simulaciones de crecimiento urbano, una conexión fuerte de los MBA con la distribución espacial y temporal del fenómeno estudiado, así como por la interacción que pueden incorporar respecto a los cambios territoriales y dinámicas socioeconómicas.

En cuanto a los productos generados por los MBA, es evidente que los resultados obtenidos pueden ayudar a anticipar interacciones del sistema, modelar estructuras, generar escenarios y simular posibles evoluciones en el tiempo y en el espacio de fenómenos complejos. Estos, a su vez, pueden servir como apoyo a la toma de decisiones en el campo de la planificación urbana y la ordenación territorial en general.

Aunque estos modelos hayan tenido resultados bastante aceptables en el mundo científico, dado los artículos publicados recientemente, todavía existen algunas dificultades para realizar la verificación, validación y calibración de los MBA. De todas formas, ya existen algunos estudios en los que se han desarrollado procedimientos para elaborar modelos cada vez más robustos. Este tipo de análisis es necesario a la hora de estudiar fenómenos complejos como los urbanos, particularmente sensibles a las condiciones de partida del modelo.

A pesar de que el desarrollo de este tipo de modelos ha sido muy prolífico en los últimos años, todavía existe una laguna importante en cuanto a la descripción de los mismos, lo que impide entender en profundidad muchos de ellos e intentar reproducirlos. Esta deficiencia podría solucionarse a través de la aplicación del protocolo ODD. Otra limitación de los MBA estaría relacionada con su estructuración, porque aunque permitan simular fenómenos y generar resultados complejos, a la vez deben ser simples, por lo que se

genera una interesante discusión respecto a la contraposición del principio *KISS versus* la complejidad intrínseca de estos modelos.

Quizás por los motivos presentados, o por otros aquí no identificados, se observa que hasta el momento no hay muchas aplicaciones en el ámbito urbano a escala regional. Concretamente en España, tampoco son suficientemente conocidas las investigaciones con MBA en el campo de las ciencias sociales (y particularmente en aplicaciones urbanas), aunque se han desarrollado otros tipos de estudios principalmente en el campo de la ecología, la informática y la economía.

Dado lo presentado, concluimos que hay una necesidad de ahondar en este campo de investigación aplicado a la simulación de fenómenos urbanos y generación de escenarios futuros. Este artículo pretende ser un primer paso para dar a conocer la existencia de los MBA a la comunidad hispana, presentar los aspectos principales de su estructura y sus potencialidades en cuanto a aplicaciones urbanas, y al mismo tiempo motivar el desarrollo de investigaciones en la línea de los modelos basados en agentes.

AGRADECIMIENTOS

La autora de este trabajo agradece a su directora de tesis Dra. Montserrat Gómez Delgado por las acertadas correcciones y los comentarios valiosos realizados en esta revisión teórica. De igual forma, se agradece a los revisores anónimos de este trabajo por sus aportaciones y críticas constructivas, que permitieron realizar mejoras importantes.

BIBLIOGRAFÍA

Acosta-Michlik, L., M.D. Rounsevell, M. Bakker, A. Van Doorn y M. Gómez Delgado (aceptado y en prensa). An agent-based model to assess land use change in a traditional agricultural landscape of Portugal. *Land Use Policy*.

Agarwal, C., G.M. Green, J.M. Grove, T.P. Evans y C.M. Schweik (2002). *A Review and Assessment of Land-Use Change Models - Dynamics of Space, Time, and Human Choice*. Department of Agriculture, Forest Service, Northeastern Research Station, Newtown Square, PA.

Aguilera Benavente, F., M. Gómez Delgado y C.C. Cantergiani (2010). Instrumentos de simulación

prospectiva del crecimiento urbano. *Ciudad y Territorio* 165-166:481-496.

Aguilera Ontiveros, A. (2000). Simulaciones multiagentes de ambientes urbanos. *Vetas Año II*, 5:205-223.

Axelrod, R. (2005). Advancing the Art of Simulation in the Social Sciences, en: J.P. Rennard (Eds.). *Handbook of Research on Nature Inspired Computing for Economy and Management*. Idea Group, Hersey, PA.

Axelrod, R. y L. Tesfatsion (2006). A guide for newcomers to agent-based modeling in the social sciences, en: L. Tesfatsion y K.L. Judd (Eds.). *Handbook of Computational Economics. Agent-based computational economics*. North-Holland, Amsterdam, The Netherlands.

Batty, M., ed. (2005). *Cities and Complexity: understanding cities with cellular automata, agent-based models, and fractals*. Massachusetts Institute of Technology.

Batty, M., J. Desyllas y E. Duxbury (2003). Safety in Numbers? Modeling Crowds and Designing Control for the Notting Hill Carnival. *Urban Studies* 40:1573-1590.

Benenson, I., I. Omer y E. Hatna (2002). Entity-based modeling of urban residential dynamics: the case of Yaffo, Tel Aviv. *Environment and Planning B* 29:491-512.

Benenson, I. y P.M. Torrens (2004). *Geographic Automata Systems: A New Paradigm for Integrating GIS and Geographic Simulation*. Southampton.

Benenson, I. y P.M. Torrens (2005). A Minimal Prototype for Integrating GIS and Geographic Simulation through Geographic Automata Systems, en: P. Atkinson, G. Foody, S. Darby y F. Wu (Eds.). *GeoDynamics*, CRC Press, Boca Raton, London, New York.

Berdoulay, V. (2009). La historia de la Geografía en el desafío de la prospectiva. *Boletín de la AGE* 51:9-23.

Börjeson, L., M. Höjer, K.-H. Dreborg, T. Ekvall y G. Finnveden (2005). *Towards a user's guide to scenarios - a report on scenario types and scenario techniques*. Final Report. Sweden, Foundation for Environmental Strategic Research.

Castle, C.J.E. (2006). Developing a Prototype Agent-Based Pedestrian Evacuation Model to Explore the Evacuation of King's Cross St. Pancras Underground Station. *CASA Working Paper Series* 108.

Castle, C.J.E. y A.T. Crooks (2006). Principles and Concepts of Agent-Based Modelling for Developing Geospatial Simulations. *CASA Working Papers Series* 110.

Couclelis, H. (2001). Why I No Longer Work with Agents: A Challenge for MBAs of Human-Environment Interactions, en: *Meeting the Challenge of Complexity: Proceedings of a Special Workshop on Land-Use/Land-Cover Change* (eds. D.C. Parker, T. Berger y S.M. Manson):3-4. Irvine, California, USA.

Epstein, J.M. y R. Axtell (1996). *Growing Artificial Societies: Social Science from the Bottom Up*. Washington D.C., MIT Press.

Epstein, J.M. (1999). Agent-Based Computational Models and Generative Social Science. *Complexity* 4(5):41-60.

Ferber, J., ed. (1999). *Multi-Agent Systems: An Introduction to Distributed Artificial Intelligence*. Reading, MA, Addison-Wesley.

Fontaine, C.M. y M.D. Rounsevell (2009). An agent-based approach to model futures residential pressure on a regional landscape. *Landscape Ecology* 24:1237-1254.

Franklin, S. y A. Graesser (1996). Is it an Agent, or just a Program?: A Taxonomy for Autonomous Agents. *Third International Workshop on Agent Theories, Architectures, and Languages*. Springer-Verlag.

Gilbert, N. (2005). Agent-based social simulation: dealing with complexity. Centre for Research on Social Simulation.

Gilbert, N. y K.G. Troitzsch, (Eds.). (2005). *Simulation for the Social Scientist*, Glasgow, Open University Press.

Grimm, V. y S.F. Railsback, eds. (2005). *Individual-based modeling and ecology*. Princeton, NJ, Princeton University Press.

Grimm, V., U. Bergerb, F. Bastiansena, S. Elias-senc, V. Ginotd, J. Giskec, J. Goss-Custarde, T.

- Grandf, S.K. Heinzc, G. Huseg, A. Hutha, J.U. Jepsena, C. Jorgensenc, W.M. Mooijh y Muller (2006). A standard protocol for describing individual-based and agent-based models. *Ecology Modelling* 198:115-126.
- Hollander, C.D. y A.S.Wu (2011). The Current State of Normative Agent-Based Systems. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 14(2):3.
- Macal, C.M. y M.J. North (2005). Tutorial on Agent-based Modeling and Simulation. *Winter Simulation Conference* (eds M.E. Kuhl, N.M. Steiger, F.B. Armstrong y J.A. Joines).
- Manson, S.M. (2007). Challenges in evaluating models of geographic complexity. *Environment and Planning B* 34:245-260.
- Matthews, R.B., N.G. Gilbert, A. Roach, J.G. Polhill y N.M. Gotts (2007). Agent-based land-use models: a review of applications. *Landscape Ecology* 22:1447-1459.
- O'Sullivan, D. y M. Haklay (2000). Agent-based models and individualism: is the world agent-based?, *Environment and Planning A* 32:1409-1425.
- Parker, D.C. (2005). Integration of Geographic Information Systems and Agent-Based Models of Land Use: Prospects and Challenges, en *GIS, Spatial Analysis, and Modeling* (eds D.J. Maguire, M. Batty y M.F. Goodchild):403-422. Redlands, California, Esri Press.
- Parker, D.C., T. Berger y S.M. Manson (2001). Agent-Based Models of Land-Use and Land-Cover Change. *International Workshop* (eds D.C. Parker, T. Berger y S.M. Manson). Irvine, California, USA.
- Parker, D.C., S.M. Manson, M.A. Janssen, M.J. Hoffmann y P. Deadman (2003) Multi-Agent Systems for the Simulation of Land-Use and Land-Cover Change: A Review. *Annals of the American Association of Geographers* 93(2):314-337.
- Polhill, J.G. (2010). ODD Updated. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 13:9.
- Railsback, S.F. y V. Grimm (2009) *A Course in Individual-based and Agent-based Modeling*, Princeton University Press.
- Railsback, S.F., S.L. Lytinen y S.K. Jackson (2006). Agent-based Simulation Platforms: Review and Development Recommendations. *Simulations* 82:609-623.
- Schelhorn, T., D. O'Sullivan, M. Haklay y M. Thurstain-Goodwin (1999). STREETS: An agent-based pedestrian model. *CASA Working Paper Series* 9.
- Serenko, A. y B. Detlor (2002). Agent Toolkits: A General Overview of the Market and an Assessment of Instructor Satisfaction with Utilizing Toolkits in the Classroom (ed http://foba.lakeheadu.ca/serenko/Agent_Toolkits_Working_Paper.pdf).
- Shelling, T. (1971). Dynamic Models of Segregation. *Journal of Mathematical Sociology* 1:143-189.
- Smith, M.J.d., M.F. Goodchild y P.A. Longley (2009). *Geospatial Analysis: a comprehensive guide to principles, techniques and software tool*. Leicester, Reino Unido, Matador.
- Tobias, R. y C. Hofmann (2004). Evaluation of free Java-libraries for social-scientific agent based simulation. *Journal of Artificial Societies and Social Simulation* 7, 1.
- Torrens, P.M. y I. Benenson (2005). Geographic Automata Systems. *International Journal of Geographical Informations Science* 19:385-412.
- Wooldridge, M. y N.R. Jennings (1995). Intelligent Agents: Theory and Practice. *The Knowledge Engineering Review* 10:115-152.

